Das Hangphänomen des Quecksilbers in hochevakuierten Kapillaren.

DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Hamburgischen Universität

vorgelegt von

CURT HAGEN

aus Hummelsbüttel

Hamburg
1926

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Genehmigt von der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Hamburgischen Universität

auf Antrag von

Professor Dr. P. P. Koch und Professor Dr. H. G. Möller.

Hamburg, den 18. Juli 1925.

Professor Dr. P. P. Koch,
Dekan

Die vorliegende Dissertation ist ein Sonderabdruck aus: Physikalische Zeitschrift, Heft 2, 1926, 27. Jahrgang, Seite 47. (Verlag S. Hirzel, Leipzig).

Curt Hagen. Überreicht vom Verfasser.

Physikalische Zeitschrift. 27. Jahrgang. 1926. Seite 47—57.

Das Hangphänomen des Quecksilbers in hochevakuierten Kapillaren.

Von Curt Hagen.

Inhaltsübersicht.

1. Einleitung.
2. Beschreibung der Apparatur.
3. Experimenteller Teil.
   a) Allgemeine Bemerkungen.
   b) Einfluß der Einstellhöhen auf die Hanglängen.
   c) Hanglängen in Abhängigkeit vom Druck.
      α) Kapillaren abgerundeter Formen.
      β) Kapillaren scharfkantiger Formen.
      γ) Einfluß der Wärmevergangenheit der Kapillaren auf die Hanglängen.
   d) Gasabgabe der Glaswandungen im Vakuum.
   e) Während des Evakuierens ausgeheizte Kapillaren.
   f) Temperatureinfluß auf die Hanglängen.
   g) Kapillaren mit innerer Siegellackbedeckung.
   h) Kapillaren mit Aufsatzstücken aus Eisen.
   i) Kapillarenaufsatzstücke aus Kupfer und Messing.
   k) Versuche mit Woodschem Metall.
   l) Wasserstofffüllung der Apparatur.
   m) Das Hangphänomen als Vakuumkriterium.
4. Zusammenfassung.

1. Einleitung.

Das in der Hochvakuumtechnik viel gebrauchte Manometer von McLeod, welches zur Messung sehr geringer Gasdrucke bis herab zu etwa 10^{-5} mm *Hg* Verwendung findet, gestattet nur dann noch einwandfreie Angaben, wenn das in der Meßkapillare durch Heben des Quecksilberspiegels zusammengedrückte Gasvolumen noch eine gut erkennbare Größe annimmt. Bei weitergeführtem Evakuieren bemerkt man — von einem gewissen Grade der Luftleere an — ein Verschwinden des restlichen Glasbläschens, so daß das Quecksilber die Meßkapillare vollkommen auszufüllen scheint. Senkt man darauffolgend den *Hg*-Spiegel wieder, so zeigt sich die Erscheinung, daß das Quecksilber in der Kapillare solange hängen bleibt, bis sich eine genügend hohe Differenz gegenüber dem Niveau im Vergleichssteigrohr gebildet hat und ein Losreißen der *Hg*-Säule erfolgt. Es läßt sich hierbei, qualitativ genommen, feststellen, daß bei fortschreitender Verdünnung des Gases eine Höhendifferenz von zunehmender Größe erforderlich wird, um das Loslösen der *Hg*-Säule zu bewirken.

Dieses Phänomen findet verschiedentlich Erwähnung in der Literatur[1]), wobei die betreffenden Autoren gleichzeitig darauf hinweisen, daß diese Erscheinung ein Mittel sein kann, eine ungefähre Abschätzung über die Güte des erreichten Vakuums vorzunehmen. So teilt beispielsweise Simon mit, „daß, wenn die *Hg*-Säule bei langsamem Hochgehen und Senken im geschlossenen Volumen bis einige Millimeter Unterdruck hängen bleibt, der Druck kleiner als $1 \cdot 10^{-8}$ mm *Hg* ist".

Diese Angaben sind natürlich nicht von Allgemeingültigkeit für jedes McLeod-Manometer, sondern je nach Bauart, Größe der Kompressionskugel, Gestalt der Meßkapillare u. dgl. eine individuelle Eigenschaft dieser Apparate. Eine Untersuchung des Hangphänomens am McLeod selbst würde eine Druckmeßvorrichtung erfordern, die einen Meßbereich aufweist, der noch weit unterhalb von den Gasdrucken liegt, bei denen die Erscheinung auftritt. Da aber — von wenigen Ausnahmen abgesehen — bisher keine Vakuummanometer hergestellt sind, die einigermaßen einwandfreie Angaben bei Drucken von 10^{-8} mm *Hg* und darunter liefern, mußte eine andere Möglichkeit geschaffen werden, um das Hangphänomen schon bei Gasdrucken messend zu verfolgen, bei denen die McLeodschen Manometer üblicher Konstruktion noch nicht versagen. Dies wird dadurch erreicht, daß man Kapillaren allein verwendet, d. h. „Mc Leods" ohne Kompressionskugel benutzt. Das Hangphänomen tritt dann schon bei Gasdrucken auf, die noch gut meßbar sind.

Das Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen war, die Abhängigkeit des Hangphänomens vom Gasdruck unter verschiedenartigen Versuchsbedingungen zu erforschen.

Im experimentellen Teil wird zunächst die Art der Abhängigkeit der Hanglängen vom Gasdruck bei Verwendung verschieden gestalteter Kapillaren dargestellt. Es folgen dann Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur, der Gasabgabe der Gaswandungen, der Wärmevergangenheit, d. h. der thermischen Vorbehandlung der Kapillaren, auf die Hangkurven und weiterhin Versuche mit Metallaufsatzstücken für die Kapillaren, mit Woodschem Metall als Verdrängungssubstanz und mit Wasserstoffüllung der Apparatur. Auf Grund der Reproduzierbarkeit der Messungen wird zum Schluß die Möglichkeit erörtert, die Hangerscheinung zu einem Meßverfahren auszugestalten.

2. Beschreibung der Apparatur.

Für die nachstehend aufgeführten Versuche wurde die in Fig. 1 skizzierte Apparatur benutzt, deren Hauptbestandteile im folgenden beschrieben werden sollen.

Zur Herstellung des Vorvakuums stand eine von Hand betriebene Zylinderölpumpe (System Geryk) zur Verfügung. Hieran angeschlossen

1) Z. B. bei H. Riegger, Über ein neues Vakuummanometer. Zeitschr. f. techn. Phys. 1, 16, 1920; A. Goetz, Physik u. Technik des Hochvakuums (Vieweg); H. Simon, Ionisationsmanometer. Zeitschr. f. techn. Phys. 6, 221, 1924.

war eine etwa 3 Liter fassende Glaskugel, welche im luftleeren Zustande als sog. Puffervakuum diente. Zur Erzeugung des Hochvakuums war ein Glaspumpenaggregat eingeschaltet, bestehend aus einer Mittel- und Hochvakuumpumpe. Beide im hiesigen Physikinstitut angefertigten Pumpen arbeiten nach dem Quecksilberdampfstrahl- und Diffusionsprinzip. Die Mittelvakuumpumpe ist mit einer doppeltwirkenden Wasserkühlung versehen.

In Verbindung mit den *Hg*-Dampfpumpen stand ein Mc Leod-Vakuummanometer, das zur Messung der geringen Gasdrucke benutzt wurde. Es war in der abgekürzten Form hergestellt, wodurch die oftmals lästige Schlauchverbindung

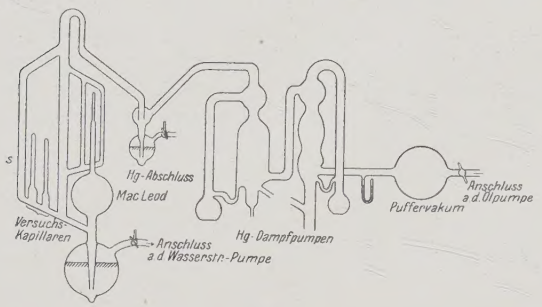

Fig. 1.

zwischen dem *Hg*-Rezipienten und der Meßkugel vermieden wird. Das Auf- und Herunterlassen des Quecksilbers während einer Druckmessung wurde durch einen Dreiwegehahn vorgenommen, der entweder die Verbindung mit der Atmosphäre oder der angeschlossenen Wasserstrahlpumpe freigab. Die Meßkugel des Mc Leod besaß einen Rauminhalt von 320 cm^3.

Die zu messende Gasmenge wurde zunächst in eine Kapillare vom Durchmesser $2r = 2{,}11$ mm hineingedrückt und anschließend daran in eine engere Kapillare ($2r = 0{,}77$ mm). Zum Vergleich der Höhenunterschiede der Quecksilberkuppen sind Kapillaren entsprechend gleicher Durchmesser parallel zu den Meßkapillaren hochgeführt worden. Auf der nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetz errechneten quadratischen Skala ließen sich Drucke bis zu 10^{-5} mm *Hg* gut ablesen.

Ein seitlich vom Hauptsteigrohr des Mc Leod abzweigendes Nebenrohr (*s*) trug die zur Untersuchung der Hangerscheinung benutzten Glaskapillaren. Somit konnte gleichzeitig eine Füllung der Kapillaren mit Quecksilber und eine Druckmessung vorgenommen werden.

Zur Trennung des Mc Leod nebst Versuchskapillaren vom übrigen Raum der Apparatur diente ein Quecksilberabschluß, der, ähnlich wie es beim Mc Leod beschrieben ist, durch einen Dreiwegehahn betätigt wurde. Durch diesen Abschluß wurde die Verwendung von Glashähnen im Hochvakuumgebiet der Apparatur vermieden. Das Hauptsteigrohr des Mc Leod war bis zu einer Länge von etwa 80 cm hochgeführt worden, um ein Überlaufen des Quecksilbers bei Steighöhen bis zu Atmosphärendruck zu verhindern.

3. Experimenteller Teil.

a) Allgemeine Bemerkungen.

Das in der Apparatur benutzte Quecksilber war durch ein Vakuumdestillationsverfahren von Fremdbestandteilen weitgehend gereinigt; es wurde ebenfalls eine sorgfältige Säuberung aller Glasteile, besonders der Kapillaren, nach den üblichen Reinigungsmethoden vorgenommen.

Für jede der zur Untersuchung der Hangerscheinung benutzten Kapillaren wurde die Depression des Quecksilbers bestimmt. Es soll in diesem Falle unter Depression derjenige Höhenunterschied verstanden werden, welcher zwischen dem *Hg*-Spiegel im Vergleichssteigrohr (Fig. 1, *s*) und dem *Hg*-Meniskus im Moment des Anschlagens im Kapillarscheitel vorhanden ist.

Hängt beim Senken des *Hg*-Spiegels eine *Hg*-Säule in der Kapillare, die bis zum Loslösen eine Länge b besitzt und beträgt die eben beschriebene Kapillarendepression die Größe a, so soll die Streckensumme $a + b$ im folgenden immer mit „Hanglänge" *Hl* bezeichnet werden.

Die Grenzen der Druckbereiche, in denen die Hanglängen bestimmt wurden, sind gegeben einmal durch die Reichweite der Meßgenauigkeit des Mc Leod — etwa 10^{-5} mm *Hg* — zum anderen durch diejenige Stelle höheren Drucks, bei der das Hangphänomen verschwindet, was, wie später gezeigt wird, ungefähr bei 10^{-3} mm *Hg* eintritt.

Um den die Messungen störenden Einfluß der Gasabgabe aus den Glaswandungen, welcher besonders bei frisch gepumpter Apparatur vorhanden ist, in genügendem Maße zu vermindern, wurden die Messungen erst nach längerem Evakuieren angestellt. Es wird in einem der folgenden Kapitel gezeigt, daß dieser Einfluß dadurch während der Zeit einer Messung unmerklich geworden ist.

b) Einfluß der Einstellhöhen auf die Hanglängen.

Da bei der Bestimmung der Hanglängen eine gleichzeitige Messung des Gasdrucks ausgeführt wurde, mußte der *Hg*-Spiegel noch um ein Stück über das obere Ende der Kapillare

gehoben werden, um die für das Mc Leod erforderliche Einstellung zu erreichen. Es war nun die Frage zu untersuchen, ob die Hanglänge, welche bei einem konstant gehaltenen Ausgangsdruck ermittelt wird, eine Veränderung erfährt, je nachdem das *Hg*-Niveau im Vergleichssteigrohr eine mehr oder minder große Einstellhöhe besitzt.

Es wurden daher eine Reihe von Messungen ausgeführt, in denen die Hanglängen bei bestimmten Gasdrucken unter Variieren der Einstellhöhen ermittelt wurden.

Es ergab sich aus allen Versuchen eine weitgehende Unabhängigkeit von der Einstellhöhe.

Zur Veranschaulichung diene eine in folgender Tabelle dargestellte Meßreihe, die bei einem Gasdruck von $6{,}2 \cdot 10^{-5}$ mm *Hg* ausgeführt ist.

Einstellhöhe (mm)	Hanglängen (mm)			
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung
3,0	16,8	17,0	17,2	17,2
90,0	17,1	16,9	17,2	17,0
320,0	17,0	17,4	17,0	17,1

c) Hanglängen in Abhängigkeit vom Druck.

α) Kapillaren abgerundeter Form. Für die Untersuchung des Hangphänomens in seiner Beziehung zum Gasdruck wurde zunächst eine Anzahl von Kapillaren verwendet, deren innerer Durchmesser von 1,0 mm bis 1,8 mm variierte und deren obere Enden Formen aufwiesen, wie

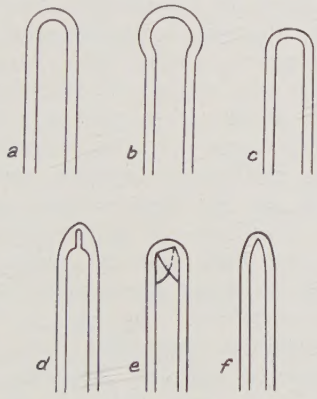

Fig. 2.

in Fig. 2a, b, c angedeutet ist. Die drei Haupttypen waren Halbkugel, Kugel und abgeflachte Kuppel. Zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Hanglängen vom Druck ist in der Fig. 3 eine Hangkurve in ihrer sich für alle Messungen darstellenden charakteristischen Gestalt aufgeführt.

Als Ordinate wurde die im vorhergehenden definierte Hanglänge (in mm) aufgetragen, während die Abszissenwerte die Gasdrucke (in mm *Hg*) angeben. Diese Angaben für den Druck sind für das obere Kurvenstück mit 10^{-5}, für das untere Kurvenstück mit 10^{-4} zu multiplizieren. Die untere Kurve ist als unmittelbare

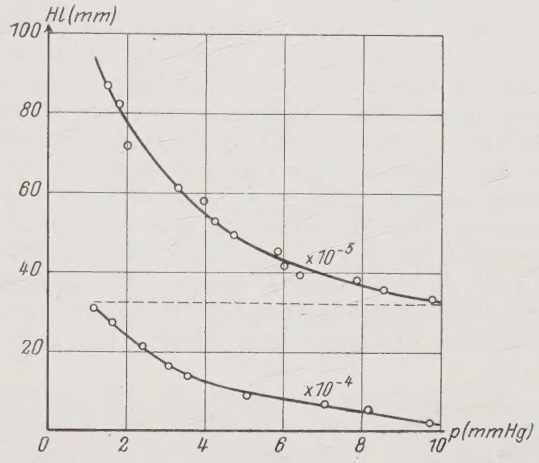

Fig 3.

Fortsetzung der oberen anzusehen und müßte eigentlich um das Zehnfache gedehnt sein, wenn der Maßstab des oberen Kurventeils zugrunde gelegt wird. Letzteres ist aber der besseren Übersicht wegen in den Zeichnungen vermieden worden.

Bei allen Kurven zeigt sich eine anfänglich rasche Abnahme der Hanglängen bei wachsendem Druck, späterhin ein flacherer Kurvenverlauf bis zu einem Grenzdruck, bei dem das Hangphänomen verschwindet.

Alle Messungen wurden mehrfach auf ihre Reproduzierbarkeit nachgeprüft und in den Grenzen der Einstellgenauigkeit bestätigt. Größere Fehler können dann eintreten, wenn die Kapillaren während einer Messung eine Erschütterung erleiden.

Zur Prüfung der Verhältnisse bei Glasröhren größerer lichter Weiten sind Untersuchungen an einer Anzahl „Kapillaren" vorgenommen worden, deren Durchmesser 2 bis 10 mm betrugen. Die Scheitelflächen dieser Röhren hatten ebenfalls abgerundete Formen. Die charakteristische Gestalt der Hangkurven ist auch hier vorhanden.

β) Kapillaren scharfkantiger Formen. Die Hangerscheinung in Kapillaren mit spitzen, scharfkantigen und kegelförmigen oberen Enden soll jetzt behandelt werden.

Es wurden zunächst Kapillaren von den in Fig. 2 d, e, f gezeichneten Formen angefertigt und längere Zeit evakuiert.

Es zeigte sich, daß bei Drucken, die noch sehr viel kleiner als $1 \cdot 10^{-5}$ mm Hg waren, ein Haften des Quecksilbers nicht eintrat. Wurden die scharfkantigen Formen jedoch durch Erhitzen nach und nach in mehr abgerundete Formen übergeführt, so wurde die Hangerscheinung in den meßbaren Druckbereichen wieder wahrgenommen.

Zur besseren Klarlegung dieser Verhältnisse wurden im besonderen Kapillaren mit kegelförmigen Enden von bestimmten Öffnungswinkeln untersucht. Aus Kupfer hergestellte kleine Stempel mit der gewünschten Kegelform wurden in die Kapillare eingeführt und zusammen mit dieser solange erhitzt, bis das zähflüssig gewordene Glas sich plastisch um den Kupferstempel legte, welcher nach dem Erkalten leicht wieder entfernt werden konnte. Die gleiche Kapillare wurde nacheinander mit Kegeln verschiedener Öffnungswinkel versehen und untersucht.

Um bei dem erforderlichen mehrmaligen Abtrennen und Wiederanschmelzen der Kapillare eine merkliche Veränderung des inneren Volums und somit auch der in der Spitze zusammengedrückten Gasmenge zu vermeiden, wurde die Kapillare nicht unmittelbar an das Seitenrohr angesetzt, sondern auf eine kleine vertikal stehende Erweiterung von bestimmtem Rauminhalt — dem Zusatzvolum — angeschmolzen.

Die benutzten Kapillaren hatten Durchmesser von 1,2 bis 1,8 mm und eine Länge von etwa 60 bis 80 mm. Aus der Reihe der Messungen sei zur Veranschaulichung das folgende Ergebnis angeführt:

1. Öffnungswinkel $\alpha = 26^0$. Das Hangphänomen tritt erst bei Drucken auf, die wesentlich geringer als $1 \cdot 10^{-5}$ mm Hg sind, also außerhalb des Meßbereichs des verwendeten Mc Leod-Manometers.

2. $\alpha = 42^0$. Die Hangerscheinung setzt etwa bei $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ mm Hg ein und gibt bei $1 \cdot 10^{-5}$ mm einen haftenden Hg-Faden von 3 mm Länge. (Die Kapillardepression im Scheitel ist nicht mit eingerechnet, da bei spitzen Kapillaren nicht einwandfrei festzustellen.)

3. $\alpha = 68^0$. Einsetzen des Hängens bei $7{,}5 \cdot 10^{-5}$ mm Hg. Es findet bei zunehmendem Druck ein anfangs recht starkes Abfallen der Hangkurve statt.

4. $\alpha = 102^0$. Ein Abweichen von den Hangkurven der Kapillaren abgerundeter Formen ist nicht zu bemerken.

Ganz ähnlich verhalten sich Kapillaren mit dachförmigen Scheiteln.

γ) Einfluß der Wärmevergangenheit der Kapillaren auf die Hanglängen. Der Schnittpunkt der Hangkurve mit der Abszissenachse sei mit Grenzdruck bezeichnet, d. i. also derjenige Druck, bei dem das Hangphänomen gerade verschwindet. Beim Vergleichen der Hangkurven findet man, daß dieser Grenzdruck bei den verschiedenartigen Kapillaren verschiedene Werte annimmt. Die Gestalt der Hangkurven an sich betrachtet, behält jedoch immer ihr gleichartiges Aussehen.

Eine Ursache für das frühere oder spätere Erreichen des Grenzdruckes liegt, wie schon in der Einleitung erwähnt, in der Menge des in der Kapillare zusammengedrückten Gases. Je größer das Kompressionsvolumen ist, um so später wird der Grenzdruck erreicht.

Wie im folgenden gezeigt werden soll, kann eine weitere Ursache in der Verschiedenheit der Grenzdrucke — wie überhaupt der Hanglängen — in der Eigenart der Versuchsbedingungen liegen, selbst dann, wenn für die Messungen die gleiche Kapillare benutzt wird.

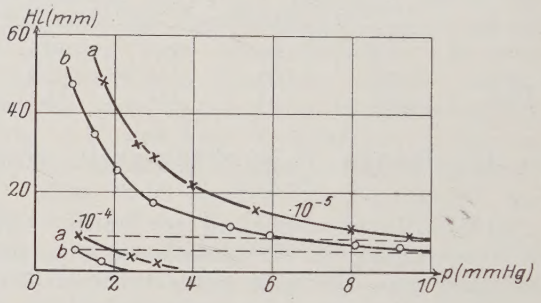

Fig. 4.

Es wurden von mehreren Kapillaren abgerundeter Form die Hangkurven bestimmt und diese auf ihre Reproduzierbarkeit geprüft. Nachdem die Apparatur wieder unter Atmosphärendruck gesetzt war, wurden die Kapillaren durch ein Gebläse längere Zeit schwach erhitzt und darauf durch einen Luftstrom schnell gekühlt. Nach dem Evakuieren wurden alsdann die Hangkurven der in ihrer Gestalt unverändert gebliebenen Kapillaren von neuem aufgenommen. Es zeigte sich eine teilweise recht merkliche Abweichung der neuen Messungen von den zuerst aufgenommenen. In Fig. 4 sind zwei solcher Meßreihen dargestellt, von denen die mit a bezeichnete vor dem Erhitzen, die mit b bezeichnete nach dem Erhitzen der gleichen Kapillare aufgenommen wurde.

In dem dargestellten Beispiel liegt die nach dem Erhitzen ermittelte Kurve unterhalb der ursprünglichen; dies ist jedoch nicht immer der Fall, vielmehr trat auch oft die entgegengesetzte Erscheinung auf.

Aus diesen Versuchen geht hervor, daß die sog. Wärmevergangenheit des Glases eine ge-

wisse Rolle spielt, wobei nach F. Eckert[1]) Änderungen der Gestaltselastizität und molekulare Umlagerungen im Glase auftręten, die vermutlich ihrerseits wieder von Einfluß auf die Hanglängen sind.

d) Die Gasabgabe der Glaswandungen im Vakuum.

Eine von atmosphärischen Drucken bis zum Hochvakuum leergepumpte Glasapparatur zeigt die bekannte und leicht zu beobachtende Erscheinung, daß bei völlig luftdichtem Abschluß eine mehr oder weniger schnelle Verschlechterung des Vakuums mit der Zeit eintritt.

Der Grund der Gasdruckzunahme liegt in der Eigenschaft der im Glas okkludierten Gasmenge, allmählich aus ersterem herauszudiffundieren. Eine wesentliche Herabminderung dieses Effekts wird durch Erwärmen der Glasteile während des Evakuierens erzielt. Es wird dies Verfahren im allgemeinen nicht auf alle Glasteile anwendbar sein, da besonders bei Anschmelzstellen die Gefahr des Zerspringens vorhanden ist.

In Hinsicht darauf, daß die bei gewöhnlicher Temperatur evakuierte Apparatur gewissermaßen als Gasquelle wirkt, liegt die Frage nahe, inwieweit die Bestimmung der Hanglängen durch diese dauernde Druckveränderung eine Beeinflussung erfährt. Zur experimentellen Klarlegung dieses Einflusses wurde folgendes Verfahren angewandt:

Eine Versuchskapillare, die genau so wie bei der Hanglängenmessung auf ein Seitenrohr aufgesetzt war, wurde bis zu einem Druck von etwa $1 \cdot 10^{-5}$ mm *Hg* evakuiert und die zu diesem Gasdruck gehörende Hanglänge festgestellt. Das Senken des *Hg*-Spiegels nach der Messung geschah aber nur soweit, daß eine Verbindung des Kapillarvolums mit dem übrigen Raum der Apparatur nicht eintrat und ein Druckausgleich somit nicht möglich war. In zeitlichen Abständen von je 5 Minuten wurden die Hanglängen von neuem bestimmt, wobei der Kapillarabschluß immer erhalten blieb.

Das Ergebnis der vielfach wiederholten Versuche war eine von Messung zu Messung abnehmende Hanglänge.

Die nach einmaligem Evakuieren aufgenommenen Werte lassen zunächst nur auf das Vorhandensein des Freiwerdens von Gas aus den Glaswandungen schließen. Um zu ermitteln, ob eine Erschöpfung der Gasquelle bei längerem Pumpen eintritt, wurde die Kapillare jedesmal, nachdem eine gewisse Anzahl von Messungen aufgenommen war, durch ein kurzes Senken des abschließenden Quecksilbers mit den in Betrieb gehaltenen Pumpen verbunden und dadurch in der Kapillare wieder ein höherer Grad der Luftleere hergestellt. Nach erfolgtem neuerlichen Abschluß wurde eine weitere Meßreihe, erstreckt

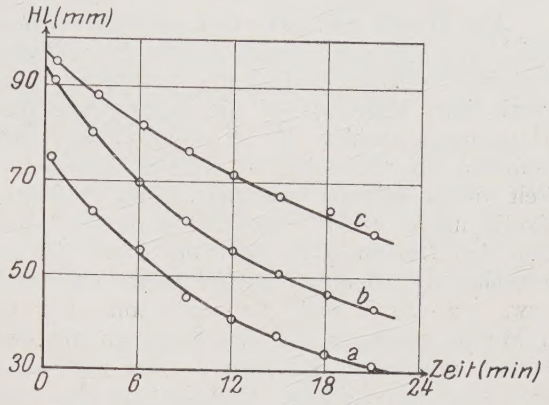

Fig. 5.

über ein bestimmtes Zeitintervall, aufgenommen und dann das angegebene Verfahren mehrmals wiederholt.

Nach diesem Verfahren sind die in Fig. 5 dargestellten drei Meßreihen aufgenommen, wobei Kurve *a* bei erstmaligem, Kurve *b* und *c* beim

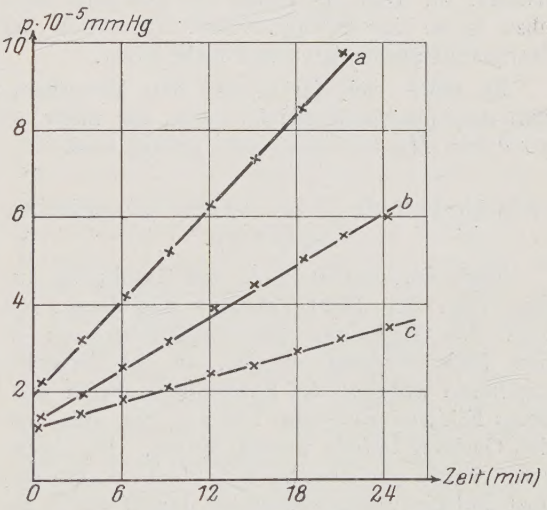

Fig. 6.

zweiten bzw. dritten Evakuieren erhalten wurden. Aus einer vorher aufgenommenen Hangkurve für die bei der Messung benutzten Kapillare konnte der zu den betreffenden Hanglängen in Fig. 5 gehörende Druck bestimmt und in ein zweites Diagramm (Fig 6) eingetragen werden. Es zeigt sich, daß die Abhängigkeit zwischen Druck und Zeit für die hier betrachteten Vakua durch eine Gerade dargestellt wird. Die Steil-

1) F. Eckert, Über die physikalischen Eigenschaften der Gläser. Jahrb. d. Rad. u. Elektr. **20**, 93—275, 1923.

heit dieser Geraden nimmt bei fortschreitender Anzahl der oben beschriebenen Evakuierungsprozesse ab. Man ersieht hieraus, daß die Ergiebigkeit der Gasquelle, definiert als die in der Zeiteinheit hervorgebrachte Gasmenge, sich bei längerem Pumpen vermindert.

Aus diesem speziellen hier angeführten Beispiel läßt sich eine überschlägliche Berechnung anstellen, welchen Einfluß die Gasabgabe während einer Messung auf die Bestimmung der Hanglängen ausübt. Es sei angenommen, daß während einer Messung die sehr hochbemessene Zeit von 1 Minute verstreicht. Als Anfangsdruck möge $3 \cdot 10^{-5}$ mm *Hg* gemessen sein. Aus den Kurven *a*, *b* und *c* der Fig. 6 ist zu entnehmen, daß dieser auf die Werte $3{,}3 \cdot 10^{-5}$ bzw. $3{,}2 \cdot 10^{-5}$ und $3{,}1 \cdot 10^{-5}$ mm *Hg* in 1 Minute gestiegen ist. Ein Vergleich mit der vorher ermittelten Hangkurve zeigt nun, daß sich statt des richtigen Hanglängenwertes von 65,0 mm Hanglängen von 61,0 bzw. 62,5 und 64,0 einstellen. In diesem Beispiel würde der prozentuale Fehler beim ersten Evakuieren 6 Proz., beim zweiten und dritten Mal 4 Proz. bzw. 1,5 Proz. betragen. Es ist hieraus zu ersehen, daß ein merklicher Einfluß des abgegebenen Gases auf die Veränderung der Hanglängen während einer Messung dann nicht vorhanden ist, wenn die Dauer des Pumpens nicht allzu kurze Zeit beträgt. Eine Korrektion der Hanglängenwerte ist somit nicht nötig.

Es zeigte sich ferner aus den Messungen, daß die Gasabgabe bei Drucken, die mehr als 10^{-3} mm *Hg* betrugen, sehr gering wird.

e) Während des Evakuierens ausgeheizte Kapillaren.

Nach der Untersuchung der Gasabgabe aus dem Glas der nicht erhitzten Kapillaren, soll jetzt das Verhalten des Hangphänomens in dem Falle dargelegt werden, wo die Versuchskapillaren während des Evakuierens durch stärkeres Erhitzen zu einem Teil von der anhaftenden Gashaut befreit worden waren. Die Apparatur wurde zunächst bis zum Hochvakuum entgast und die Versuchskapillare darauf durch ein Handgebläse vorsichtig während einiger Minuten bis kurz vor dem Erweichungspunkt des Glases erhitzt. Nach der Abkühlung bis auf Zimmertemperatur begann die Bestimmung der Hanglängen. Für die Messungen wurde das schon im vorigen Kapitel beschriebene Verfahren verwendet, d. h. es wurde das in der Kapillare befindliche Quecksilber nach jeder Messung nur soweit gesenkt, daß ein Kommunizieren des Kapillarraumes mit dem übrigen Raum der Apparatur nicht möglich war.

Aus der Reihe der aufgenommenen Messungen sind in Fig. 7a und b zwei für diese Versuche typische Punktfolgen aufgeführt, die sich über ein Zeitintervall von etwa 30 Minuten erstrecken. Ordinaten sind hier die von fünf zu fünf Minuten bestimmten Hanglängen.

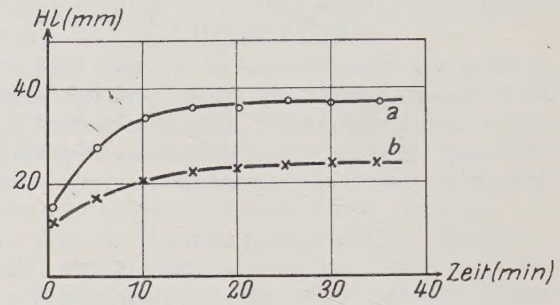

Fig. 7.

Das anfängliche Anwachsen der Kurven ist damit zu erklären, daß die vorher durch Erhitzen teilweise entgaste Innenfläche der Kapillare nunmehr im abgekühlten Zustande von neuem die Fähigkeit der Sorption erhalten hat. Durch das teilweise Hineindiffundieren der in der Kapillare abgeschlossenen Gasmenge in die Glaswandung wird eine Druckverminderung hervorgerufen, die ihrerseits ein Anwachsen der Hanglängen zur Folge hat. Je nach dem Grade der anfänglichen Entgasung der Glasfläche wird ein mehr oder minder starker Anstieg der Hanglängen zu bemerken sein.

Bei diesen Untersuchungen ergibt sich somit, daß die im Vakuum ausgeheizten Kapillaren durch ihre Fähigkeit der Gasbindung im kalten Zustande bei den Messungen einen geringeren Druck vortäuschen können, als dieser in Wirklichkeit beträgt.

f) Temperatureinfluß auf die Hanglängen.

Die Ermittlung der Hanglängen bei den vorhergehend beschriebenen Untersuchungen wurde immer bei Zimmertemperatur ausgeführt. Es war nun eine weitere Aufgabe, festzustellen, in welchem Maße sich ein Einfluß auf die Werte der Hanglängen bei den Temperaturen bemerkbar macht, die noch keine Loslösung der im Glas absorbierten Gase bewirken oder gar eine innere Umwandlung des Glases hervorrufen, wie dies ja bei höheren Temperaturen eintreten kann.

Die in Betracht kommenden Wärmegrade lagen bei diesen Versuchen ungefähr zwischen 20^0 und 70^0 C. Für die Erwärmung der Kapillaren wurde die in Fig. 8 angedeutete Anordnung benutzt. Die Versuchskapillare war mit einem Glasrohr als Heizmantel umgeben; durch

zwei Schlauchverbindungen war ein Wassergefäß angeschlossen, welches von außen geheizt werden konnte. Der sich ausbildende Konvektionsstrom zirkulierte im Heizmantel von oben nach unten bei gleichzeitiger Erwärmung der Kapillare. Zur

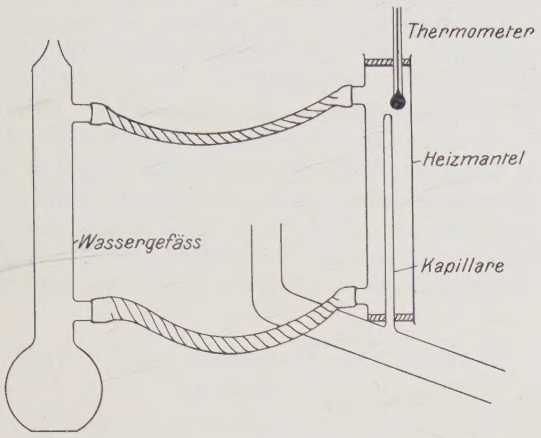

Fig. 8.

Messung der Temperatur diente ein im oberen Ende des Heizmantels eingeführtes Thermometer.

Die Ausführung der Messungen geschah jedesmal nach vorhergehendem längeren Erwärmen der Kapillare unter gleichzeitigem Evakuieren. Das Aufsteigen des Quecksilbers wurde

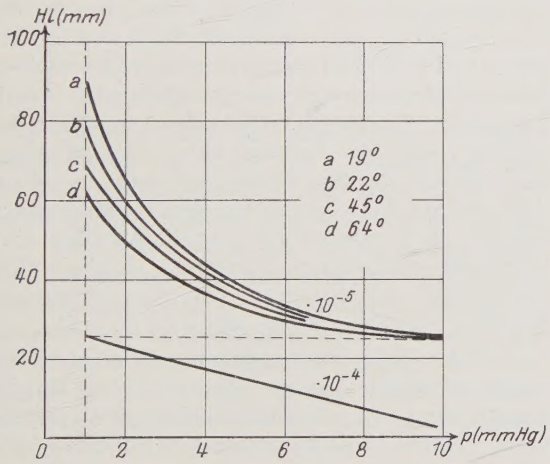

Fig. 9.

mit geringer Geschwindigkeit ausgeführt, um eine Erwärmung des Meniskus auf die jeweilig eingestellte Temperatur zu ermöglichen.

Die mit verschiedenen Kapillaren (Durchmesser von 1,0— 1,8 mm) ausgeführten Versuche zeigten gute Reproduzierbarkeit und ergaben einen merklichen Temperatureinfluß bei niedrigen Drucken und höheren Wärmegraden. In Fig. 9 sind vier Hangkurven der gleichen Kapillare bei vier verschiedenen Temperaturen (19°, 32°, 45° und 64° C) gezeichnet. Bei einem Druck von $1 \cdot 10^{-5}$ mm *Hg* ist zwischen Kurve *a* und Kurve *d* bei einem Temperaturunterschied von 45° C eine Hanglängendifferenz von etwa 30 mm vorhanden, was einer Abweichung von 33 Proz. entspricht. Bei einem Druck von $1 \cdot 10^{-4}$ mm *Hg* dagegen ist der Unterschied der Hanglängenwerte und somit auch die prozentuale Abweichung fast unmerklich.

Man ersieht hieraus, daß die in praxi vorkommenden Temperaturschwankungen einen ins Gewicht fallenden Einfluß auf die Hanglängenwerte kaum ausüben, wenn die Methode nicht in sehr niedrige Druckgebiete hinein verfolgt wird.

g) Kapillaren mit innerer Siegellackbedeckung.

Die Untersuchung des Hangphänomens wurde auf die Fälle erstreckt, bei denen die Grenzflächen, zwischen denen die Adhäsion wirkte, aus Glas und Quecksilber gebildet wurden. Es sollen nun Versuche beschrieben werden, die nach Ersetzen einer dieser Grenzschichten durch eine solche von anderer Substanz vorgenommen wurden. Die Grenzschichten bestanden aus:

Quecksilber—Siegellack,
Quecksilber—Eisen,
Quecksilber—Quecksilber,
Woodsches Metall—Glas.

Für die erste Untersuchung mit den Grenzflächen *Hg* und Siegellack wurden Kapillaren von 2,0 bis 2,7 mm Durchmesser und abgerundeten Formen verwendet. Der Siegellack wurde in pulverisierter Form und geringer Menge in die trockene, gut gereinigte Kapillare eingeführt und deren geschlossenes Ende alsdann unter fortgesetztem Drehen langsam erwärmt. Der weiche Siegellack setzte sich an der Glasfläche in Form eines dünnen haubenartigen Überzugs fest, der, von der Kapillarspitze an gerechnet, etwa 5 bis 10 mm herabreichte. Die geringe Schichtdicke, welche nach Beendigung der Versuche zu ungefähr 0,2 mm bestimmt wurde, erlaubte bei seitlicher Beleuchtung eine Beobachtung des Umrisses des *Hg*-Meniskus und dadurch auch das Ablesen von Hanglängen geringer Größe.

Die aus diesen Versuchen gewonnenen Kurven zeigen allgemein die gleiche charakteristische Gestalt wie die sonstigen Hangkurven.

In einigen Fällen wurde eine Abweichung von folgender Art wahrgenommen: Nach Unterschreiten des Grenzdrucks, bei dem das Hangphänomen gerade auftritt, blieb der *Hg*-Faden in der Versuchskapillare nach dem Senken des *Hg*-Spiegels bis zu einer gewissen Länge hängen

und riß dann an einer von Messung zu Messung verschiedenen Stelle unterhalb der Kapillarspitze ab. Die Ansicht, daß etwaige kleine Inhomogenitäten der Siegellackschicht einen Einfluß ausgeübt hätten, führte dazu, den Siegellack vorsichtig zu erwärmen und — nach dem Erkalten des letzteren — die Messungen von neuem auszuführen. Hierbei zeigte sich, daß es in allen Fällen möglich war, die normale Hangerscheinung wieder herbeizuführen.

h) Kapillaren mit Aufsatzstücken aus Eisen.

Durch das Anbringen von eisernen Aufsatzstücken auf die oberen geöffneten Kapillarenden war eine Hanguntersuchung zwischen den Grenzschichten *Hg*—Eisen möglich. Das in Fig. 10a

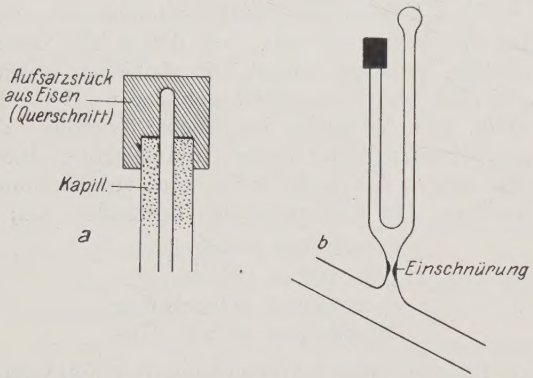

Fig. 10.

abgebildete zylindrische Aufsatzstück besaß einen Bohrkanal, der den gleichen Querschnitt wie die Kapillare hatte und eine Verlängerung der letzteren bildete. Die Eisenhütchen wurden mit weißem Siegellack luftdicht auf die Kapillare gekittet. Die Luftdichtigkeit dieser Ansatzstellen wurde bei evakuierter Apparatur besonders geprüft und bestätigt gefunden. Für die Feststellung derjenigen Hanglängen, die sich wegen der Aufsatzstücke der unmittelbaren Beobachtung entzogen, gelangte die in Fig. 10b skizzierte Anordnung zur Verwendung.

Ein kleines mit Einschnürungsstelle versehenes Glasrohr war mit zwei U-förmig angeordneten Kapillaren verbunden. Die eine für die Hangmessungen bestimmte Kapillare trug einen Eisenaufsatz, während die andere Vergleichskapillare am oberen Ende zu einer kleinen Kugel erweitert war. Durch diese Anordnung wurde erreicht, daß der in der einen Kapillare herunterfallende *Hg*-Faden ein Hochschnellen des Quecksilbers im Vergleichsrohr verursachte. Es ergab sich aus den Versuchen, die mit Kapillaren ohne Eisenhütchen ausgeführt wurden, daß der Reaktionsstoß im Vergleichsrohr noch dann wahrzunehmen war, wenn der *Hg*-Faden beim Loslösen vom Kapillarenscheitel aus etwa 2 mm Höhe herabfiel.

Die in der Folge unter Verwendung von Eisenaufsatzstücken angestellten Versuche ergaben nun, daß die Hangerscheinung selbst bei Drucken, die weit unterhalb von $1 \cdot 10^{-5}$ mm *Hg* lagen, ausblieb.

Wurden daraufhin einige der Eisenhütchen in ähnlicher Weise, wie im vorigen Kapitel beschrieben ist, mit einem inneren Siegellacküberzug versehen, so trat bei den neuerlich aufgenommenen Versuchen das Hangphänomen in normaler Weise wieder auf.

i) Kapillarenaufsatzstücke aus Kupfer und Messing.

Es gelangte eine Anzahl von Aufsatzstücken aus amalgambildenden Metallen (bzw. Legierungen) zur Untersuchung. Man hat in diesem Falle zwei gleichartige Grenzflächen, nämlich *Hg*—*Hg*. Die Formen und Maße dieser Metallhütchen waren ganz ähnlich dem in Fig. 10a abgebildeten Eisenhütchen. Bei der Herstellung der inneren Amalgamschicht wurde folgendermaßen verfahren: Das Metallhütchen wurde zunächst mit Ausnahme des Bohrkanals mit einem Paraffinüberzug versehen; darauf wurde die Kanalwandung mit verdünnter Salpetersäure angeätzt und schließlich durch Verreiben einer kleinen Quecksilbermenge eine zusammenhängende Amalgamschicht hergestellt. Nachdem der Paraffinüberzug, der ein Anätzen bzw. Amalgamieren der übrigen Stellen verhindern sollte, entfernt war, konnte durch Aufkitten des Metallhütchens auf das obere ebene Ende der Glaskapillare eine luftdichte Verbindung hergestellt werden. Die Anordnung zwischen Versuchs- und Vergleichskapillare war die gleiche wie in Fig. 10b.

Neben den beschriebenen Metallaufsätzen wurde noch eine Ganzmetallkapillare aus Kupfer angefertigt und in der beschriebenen Weise mit einer inneren Amalgamschicht versehen.

Die vielfach wiederholten Versuche zeigten, daß das Hangphänomen in den meßbaren Druckbereichen (bis 10^{-5} mm *Hg*) gänzlich ausblieb. Wurde jedoch das Vakuum durch sehr langes Pumpen erhöht, so trat die Erscheinung in vollem Maße wieder auf.

Es sei noch erwähnt, daß einige der Metallaufsätze nach der Messung aufgeschnitten wurden zwecks Feststellung einer fehlerfreien Amalgamschicht. Dies konnte in allen Fällen bestätigt werden.

k) Versuche mit Woodschem Metall.

Infolge der Eigenschaft einiger Metallegierungen, schon bei mäßig hohen Temperaturen flüssig zu werden, war eine Möglichkeit gegeben, das bei den Messungen in der Versuchskapillare benutzte Quecksilber durch eine derartige Legierung zu ersetzen und somit eine andersartige Grenzschicht zu schaffen. Im vorliegenden Falle wurde die bekannte Woodsche Legierung angewandt, deren Schmelzpunkt zu etwa 68° C bestimmt wurde. Um das Metall im flüssigen Zustand zu erhalten, war es erforderlich, die Versuchskapillare nebst dem angeschlossenen Gefäß mit dem darin befindlichen Metall in ein Wärmebad zu tauchen. Dies wurde in der Weise ausgeführt, wie es in Fig. 11

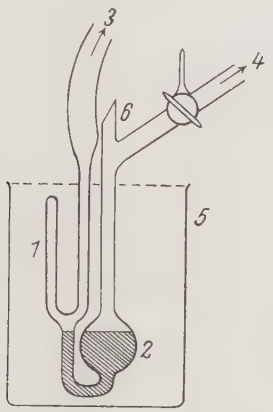

Fig. 11.

dargestellt ist. Die Versuchskapillare (1) steht einmal durch das Rohr (3) in Verbindung mit den Hochvakuumpumpen, zum andern mit dem kugelförmigen Behälter mit Woodschem Metall (2). Durch Betätigen des Dreiweghahns kann die flüssige Legierung entweder in die Kapillare gedrückt oder wieder zurückgezogen werden, je nachdem die Verbindung mit der äußeren Luft oder der Wasserstrahlpumpe freigegeben wird. Die ganze Anordnung ist mit einem Wassergefäß (5) umgeben, welches von außen angeheizt wird.

Durch einen Hg-Abschluß konnte das Mc Leod und die Versuchskapillare von der übrigen Apparatur getrennt werden.

Das leicht oxydierende Woodsche Metall wurde zunächst von der Oxydhaut befreit und im festen Zustande in das geöffnete Ansatzrohr (Fig. 11) gebracht. Nach dem Zuschmelzen desselben wurde die Apparatur evakuiert und das Wasserbad auf die Temperatur von etwa 75—80° C erwärmt, wodurch das Woodsche Metall zum Schmelzen gebracht wurde.

Nach fortgesetztem längeren Evakuieren bis zu Drucken, die weit unterhalb des Meßbereichs vom Mc Leod lagen, wurden die Hangversuche angestellt, wobei in keinem Falle ein Haften des Woodschen Metalls in der Kapillare festgestellt werden konnte.

l) Wasserstoffüllung der Apparatur.

Es verbleibt noch die Klarlegung der Frage, in welchem Maße ein Einfluß auf das Hangphänomen gegeben ist, falls die in der Kapillare zusammengedrückte Luft durch ein Gas von anderer Beschaffenheit ersetzt wird.

Wegen seines von Luft stark abweichenden Molekulargewichts wurde Wasserstoff zur Füllung der Apparatur verwendet. Um die in ihrer ursprünglichen Anordnung (Fig. 1) benutzte Apparatur in allen Teilen gut mit H_2-Gas zu durchsetzen, wurde diese zunächst bis zum Hochvakuum entgast und darauf der Wasserstoff langsam eingeleitet, bis der Druck wieder auf etwa 1 Atmosphäre gestiegen war. Nach erneutem Evakuieren konnte jedesmal eine Meßreihe von einer Anzahl der auf dem Seitenrohr angebrachten Kapillaren aufgenommen werden. Vor jeder der mehrfach wiederholten Hanglängenmessungen wurde die Apparatur in der beschriebenen Weise von neuem mit Wasserstoff gefüllt. Von den benutzten Kapillaren wurde vor und nach den Versuchen mit Wasserstoff je eine Hangkurve bei Luftfüllung bestimmt und diese mit den bei H_2-Füllung ermittelten verglichen.

Das Ergebnis dieser Versuche war, daß ein merklicher Einfluß auf die Größe der Hanglängen nicht besteht und sich die Hangkurven für Luft- und H_2-Füllung identisch erwiesen.

Zur Veranschaulichung dieser Tatsache ist in Fig. 12 eine Reihe von Meßpunkten darge-

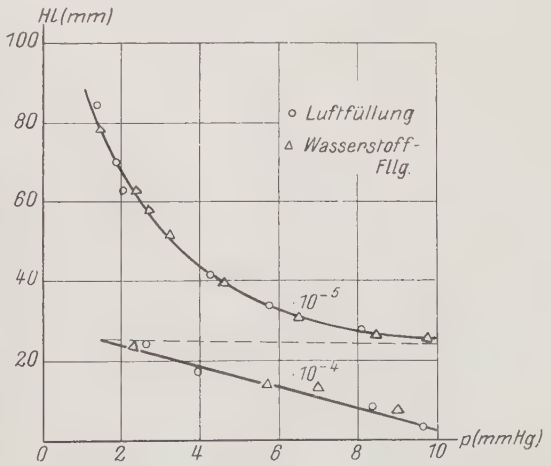

Fig. 12.

stellt, von denen die mit einem Kreis bezeichneten bei Luftfüllung, die mit einem Dreieck markierten bei Wasserstoffüllung bestimmt worden sind. Hieraus ist zu ersehen, daß beide Meßreihen der gleichen Hangkurve zugeordnet werden können.

m) Das Hangphänomen als Vakuumkriterium.

Bei den normal behandelten Glaskapillaren abgerundeter Formen hat es sich gezeigt, daß die Reproduzierbarkeit der Messungen in ausreichender Weise gewährleistet ist. Es besteht damit die Möglichkeit, die Hangerscheinung für bestimmte Druckgebiete als Meßmethode heranzuziehen und sie an die Stelle des Mc Leod oder anderer Meßvorrichtungen zu setzen. Es sollen im folgenden einige Eigenarten erörtert werden, die sich bei der Verwendung dieses Vakuumkriteriums ergeben würden.

Die Anordnung der Kapillare, mit der die Bestimmung der Hanglängen vorgenommen werden soll, ist natürlich in anderer Weise auszuführen, wie es bei den beschriebenen Untersuchungen geschehen ist, beispielsweise derart, wie in Fig. 13 angedeutet sei.

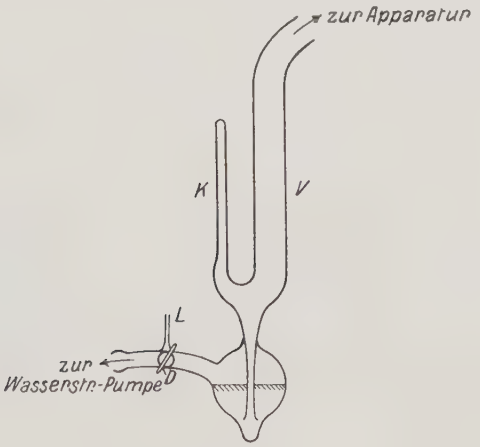

Fig. 13.

Von der Apparatur ist ein weites Vergleichssteigrohr (V) abgezweigt und parallel zu der Meßkapillare (K) heruntergeführt. Ein von dieser U-förmigen Anordnung nach unten gehendes Rohr mündet in einen Quecksilberglasbehälter. Das Heben und Senken des Quecksilbers geschieht, wie dies vorhergehend schon mehrfach beschrieben ist, durch einen seitlich am Glasbehälter angebrachten Dreiwegehahn (D), der zum Heben des Hg-Spiegels durch das kleine Kapillarrohr (L) Luft einströmen läßt, bzw. durch Herstellung einer Verbindung mit der angeschlossenen Wasserstrahlpumpe ein Senken des Quecksilbers bewirkt. Bei dieser Anordnung würde die zur Füllung der Kapillare und des Vergleichssteigrohrs benötigte Quecksilbermenge wesentlich geringer sein, als die für ein Mc Leod benutzte. Die Ausführung einer Messung kann in geringer Zeit erfolgen, da beim Heben des Hg-Spiegels bis zum Berühren des oberen Kapillarendes eine genau zu regulierende Einstellhöhe im Vergleichsrohr nicht erforderlich ist, wie in Kap. 3b dargelegt wurde.

Die Feststellung der Hanglängen steht der Ablesemöglichkeit der oft recht geringen Höhendifferenz zwischen dem Hg-Meniskus der Meß- und Vergleichskapillare im Mc Leod-Manometer nicht nach, zumal noch der Umstand bemerkenswert ist, daß die Höhenunterschiede bei abnehmendem Druck im Mc Leod kleiner, die Hanglängen dagegen unter gleichen Verhältnissen größer werden.

Erschwerend für die Anwendung der Hangmethode als Vakuumkriterium ist zunächst die Eigenschaft, daß jede Kapillare empirisch geeicht werden muß. Die Ausführung der Eichung einer solchen Kapillare braucht nicht unbedingt an dem Orte zu erfolgen, wo die Kapillare Verwendung finden soll, sondern kann unabhängig hiervon in Verbindung mit der Eichvorrichtung (Mc Leod usw.) vor sich gehen. Beim Einbau in die Apparatur ist nur zur Vermeidung von Meßfehlern darauf zu achten, daß die Kapillare keine Veränderung ihres inneren Volums erleidet oder am oberen Ende stark erwärmt wird. Der Meßbereich der Hangmethode ist auf Druckintervalle festgelegt, deren Schranken einmal durch den Grenzdruck, zum andern durch die Reichweite der Meßvorrichtung, die zur Eichung benutzt wird, gegeben sind.

Eine Extrapolation der Hangkurve nach der Seite der Gasdrucke hin, die wesentlich unterhalb 10^{-5} mm Hg liegen, hat sich praktisch nicht als durchführbar erwiesen, da der in der Kapillare haftengebliebene Hg-Faden sich bei diesen Drucken oft nicht von der Spitze loslöst, sondern an irgendeiner Stelle unterhalb derselben auseinanderreißt.

4. Zusammenfassung.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Untersuchung einer mit Hangphänomen bezeichneten Adhäsionserscheinung des Quecksilbers in hochvakuierten Kapillaren.

Es wird zunächst eine zur Hauptsache aus Vakuumpumpen und einem Mc Leod-Manometer bestehende Apparatur beschrieben, die gestattet, gleichzeitig den Gasdruck und die als Kriterium

der Adhäsionskräfte dienende Hanglänge des Quecksilbers zu bestimmen.

Die an Kapillaren verschiedener Durchmesser festgestellte Gesetzmäßigkeit zwischen dem Gasdruck und der Länge der haftenden *Hg*-Säule drückt sich in einer für alle Messungen charakteristischen Kurvengestalt (Hangkurve) aus. Bei Drucken von der Größenordnung 10^{-3} mm *Hg* verschwindet das Hangphänomen.

Weitere Ergebnisse von den Untersuchungen, welche unter verschiedenen Bedingungen ausgeführt wurden, sind folgende:

Bei Verwendung von Kapillaren spitzer oder scharfkantiger Gestalt ihrer Scheitelflächen tritt kein Hängen des Quecksilbers auf.

Die Hangkurven der gleichen Kapillare weisen allgemein eine Verschiedenheit in der Lage zum Koordinatensystem auf, falls die Kapillare vor jeder Meßreihe eine besondere thermische Vorbehandlung erfährt. (Wärmevergangenheit des Glases).

Die im Hochvakuum auftretende Gasabgabe der Glaswandungen erwies sich bei der kurzen Dauer jeder Hanglängenbestimmung als wenig störend. Es konnte weiterhin gezeigt werden, daß bei Kapillaren, welche während des Evakuierens erhitzt wurden, das Einsetzen des Hangphänomens schon bei verhältnismäßig höheren Drucken erfolgte.

Durch Anbringen einer Heizvorrichtung wurden Hangkurven der gleichen Kapillaren bei verschiedenen mäßig hohen Temperaturen aufgenommen. Der Kurvenverlauf wird bei steigender Temperatur flacher. Besonders merklich ist dies in Gebieten niedriger Drucke.

In einem weiteren Versuche wird das Hangphänomen zwischen einer an der Innenfläche der Kapillare befindlichen Siegellackschicht und dem Quecksilber dargelegt. Die hierbei ermittelten Hangkurven zeigen nur quantitative, aber keine grundsätzlichen Abweichungen in bezug auf die normalen Kurven.

Kapillaren mit eisernen Aufsatzstücken, versehen mit gleichkalibrigen Bohrkanälen, lassen das Hangphänomen selbst im höchsten Vakuum vermissen.

Bei Verwendung ähnlicher Aufsatzstücke aus amalgambildenden Metallen (Kupfer, Messing) haftet das Quecksilber erst — dann aber in vollem Maße — bei Drucken, die weit geringer als 10^{-5} mm *Hg* (Meßgrenze des Mc Leod) sind.

Messungen, die bei Wasserstofffüllung der Apparatur angestellt wurden, ergaben Hangkurven, die mit denjenigen bei Luftfüllung aufgenommenen identisch waren.

Statt des Quecksilbers wurde Woodsches Metall als Verdrängungsflüssigkeit eingeführt. Eine Hangerscheinung konnte nicht festgestellt werden.

Den Abschluß des experimentellen Teils bildet eine Erörterung über die Anwendungsmöglichkeit des Hangphänomens für Meßzwecke, da sich die Hanglängenbestimmung als gut reproduzierbar erweist. —

Die vorliegende Arbeit wurde auf Veranlassung von Herrn Prof. Dr. H. G. Möller im Phys. Institut der Hamb. Universität ausgeführt.

Dem Direktor, Herrn Prof. Dr. P. P. Koch, sowie meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. H. G. Möller, bin ich für die freundliche Unterstützung und wissenschaftliche Anregung wie auch für manchen wertvollen Rat zu größtem Danke verpflichtet.

Der Heinrich Hertz-Gesellschaft, die zur Durchführung der Untersuchungen Mittel zur Verfügung stellte, sei ebenfalls an dieser Stelle gedankt.

Hamburg, Institut für angew. Physik der Hamb. Universität, Dezember 1925.

(Eingegangen 2. Dezember 1925.)

Lebenslauf.

Am 31. August 1898 wurde ich, Curt Hagen, als Sohn des Ober-Postsekretärs Hermann Hagen in Hamburg geboren. Ostern 1905 trat ich in die Vorschule der Ober-Realschule an der Uhlenhorst ein. Von der Sexta bis zur Ablegung der Einj.-Prüfung besuchte ich die Realschule in Barmbeck. Von dort ging ich auf die Ober-Realschule Eppendorf über.

Mein Eintritt ins Heer erfolgte am 11. IV. 17. Vom Felde beurlaubt, bestand ich im September 1918 in der letztgenannten Schule meine Abiturientenprüfung. Nach der Entlassung aus dem Heere begann ich im Januar 1919 meine Studien an der Hamburger Universität. Im Sommersemester 1921 hörte ich Vorlesungen an der Universität Freiburg (Baden).

Am 1. Juni 1925 wurde ich als wissenschaftlicher Assistent am Universitäts-Institut für angewandte Physik in Hamburg angestellt. Am 18. Juli bestand ich meine mündliche Doktorprüfung.

Für die Belehrung und Förderung meiner Studien bin ich folgenden Herren Professoren und Privatdozenten zu aufrichtigem Danke verpflichtet: Blaschke, Bolza, Cassirer, Classen, Estermann, Furch, Goos, Hecke, Himstedt, Klebahn, Koch, Lenz, G. Meyer, H. G. Möller, Paneth, Rabe, Rademacher, Radon, Riebesell, Schorr, B. Schulz. O. Stern, Volmer, Winkler, Witkop.